

СУБНАНОСЕКУНДНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ, СОСТОЯЩИЙ ИЗ ТРЕХ СЕКЦИЙ

© 2022 г. В. Ф. Тарасенко^{a,*}, С. Б. Алексеев^a, Е. Х. Бакшт^a

^a Институт сильноточной электроники СО РАН
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3

*e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 20.01.2022 г.

После доработки 03.02.2022 г.

Принята к публикации 04.02.2022 г.

Описана конструкция и приведены результаты испытаний субнаносекундного ускорителя, состоящего из трех секций (двойной формирующей линии, ферритовой линии и линии с переменным волновым сопротивлением), а также газонаполненного диода. За анодной фольгой зарегистрирована амплитуда тока пучка ≈ 2.7 кА при длительности импульса на полувысоте ≈ 370 пс. Созданный ускоритель позволил с помощью стандартного спектрометра исследовать в образцах из кварцевого стекла КУ-1, полиметилметакрилата и КВг излучение Вавилова–Черенкова, а также импульсную катодолюминесценцию.

DOI: 10.31857/S0032816222040073

ВВЕДЕНИЕ

Ускорители электронов с короткой длительностью импульса тока и напряжением генераторов 10^2 – 10^3 кВ широко используются в различных областях науки и техники и постоянно совершенствуются, см., например, [1–11]. Пучки электронов обычно формируются в вакуумном диоде, на который подаются импульсы напряжения короткой длительности, а для вывода тока пучка в воздух и другие газы применяют аноды из тонкой фольги [1–7]. В последние годы возрос интерес к исследованиям излучения Вавилова–Черенкова (В.–Ч.) под воздействием пучков с энергией электронов в сотни килоэлектронвольт при наносекундной и субнаносекундной длительности импульса тока пучка [12].

В недавних работах [9, 10] сообщалось о создании ускорителя, в котором использовались высоковольтный блок ускорителя АРСА, собранный по схеме Маркса, газонаполненный формирователь и ступенчатая линия, нагруженная на отпаянную ускорительную трубку. Модернизированный ускоритель [10] позволил получить длительность импульса тока пучка на полувысоте 0.27 нс при его амплитуде 1.5 кА и максимальной энергии электронов 0.95 МэВ. Однако данный ускоритель весьма сложен в изготовлении и настройке. Только газонаполненный формирователь для получения короткой длительности импульса напряжения имеет три разрядных промежутка, заполненные азотом до давления 0.4 МПа.

Другой подход к формированию субнаносекундных и пикосекундных импульсов высокого напряжения состоит в применении ферритовых линий, обычно не менее двух, которые помещаются в продольное магнитное поле соленоидов [13, 14]. В таких установках импульс напряжения от первичного генератора со сравнительно большой длительностью импульса напряжения и его фронта подается на линии с ферритовыми кольцами со ступенчато уменьшающимися диаметрами. Такая схема ускорителя позволила получить на согласованной нагрузке импульс напряжения амплитудой 1.12 МВ при длительности на полувысоте 0.65 пс и скорости нарастания мощности в нагрузке 110 ГВт/нс [15].

Нами был создан ускоритель электронов ГИН-500 с отпаянным разрядником Р-49 с напряжением холостого хода до 500 кВ, который состоял из двух секций и газонаполненного диода [11]. Путем изменения давления воздуха в диоде обеспечивалось управление длительностью импульса и плотностью тока пучка, а также варьирование амплитуды напряжения на промежутке. При длительности импульса тока пучка на полувысоте 1.3 нс и напряжении на диоде ≈ 350 кВ амплитуда тока пучка за фольгой составила 700 А, а плотность тока ≈ 250 А/см². Также было продемонстрировано, что дополнительная линия простой конструкции с переменным волновым сопротивлением позволяет увеличить напряжение

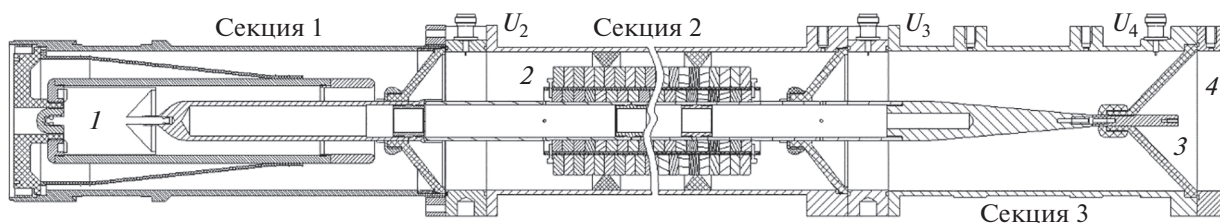


Рис. 1. Схема ускорителя ГИН-1000, показаны три высоковольтные секции при их оптимальном расположении. 1 – газовый разрядник Р-49; 2 – линия с ферритовыми кольцами; 3 – газонаполненный диод, который закрывается анодной фольгой 4.

на промежутке и, соответственно, энергию электронов.

Генератор с отпаянным разрядником РО-49, который работал при давлении водорода 1.2 МПа, описан в недавней работе [16]. Он был использован в компактном рентгеновском аппарате с напряжением 100–400 кВ.

Применение электронного пучка ускорителя ГИН-500 для возбуждения свечения кварцевого стекла КУ-1, сапфира и синтетического алмаза позволило зарегистрировать с помощью стандартного спектрометра HR2000+ES излучение В.–Ч. [11, 12]. Однако при уменьшении длительности импульса тока пучка, что достигалось за счет увеличения давления воздуха в газовом диоде, амплитуда тока пучка существенно уменьшалась. Кроме того, из-за сравнительно большой длительности фронта импульса напряжения (≈ 2 нс на уровне 0.1–0.9) преимущества второй секции были использованы не полностью. Для разделения вкладов излучения В.–Ч. и импульсной катодoluminesценции (и.к.л.) в спектры излучения различных образцов желательно уменьшать длительность импульса тока пучка и увеличивать его плотность. Как известно, см., например, [12], импульс излучения В.–Ч. повторяет по своей форме импульс тока электронного пучка.

В ряде работ, например [13–15], как отмечено выше, было показано, что для сокращения длительности импульса напряжения и увеличения его амплитуды перспективно использовать коаксиальные линии с ферритовыми кольцами (ферритовые линии), которые помещаются в магнитное поле соленоида.

Цель настоящей работы – за счет применения в генераторе ускорителя электронов ГИН-500 третьей секции на основе ферритовой линии с соленоидом сократить длительность импульса тока пучка, повысить напряжение на газовом диоде и увеличить амплитуду и плотность тока пучка. Кроме того, ставилась задача тестирования созданного ускорителя с субнаносекундной длительностью импульса тока пучка в экспериментах по изучению излучения В.–Ч. и и.к.л. при энергии электронов в сотни килоэлектронвольт.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЙ

Конструкция высоковольтного блока ускорителя с газонаполненным диодом показана на рис. 1. В генератор ускорителя ГИН-500 [11] была добавлена третья секция на основе ферритовой линии. В газовом диоде использовался воздух, который откачивался форвакуумным насосом. В первой секции ускорителя использовалась двойная формирующая линия с промышленным двухэлектродным разрядником Р-49 высокого давления, который соединялся с внутренним высоковольтным электродом. Волновые сопротивления каждой из двух формирующих линий первой секции составляли ≈ 20 Ом. Волновое сопротивление передающей линии, соединенной со второй секцией, равно 50 Ом. Вторая секция с ферритовыми кольцами имела длину 49 см и была помещена в соленоид (на рисунке не показан). Одновременно применялись выполненные из феррита марки 55ВНП-1 кольца двух диаметров; их расположение в линии показано на рис. 1. Для колец большего размера внешний и внутренний диаметры составляли соответственно 80 и 50 мм, а для колец меньшего размера – 45 и 28 мм. Толщина одного кольца равнялась 7.5 мм. Третья секция состояла из неоднородной коаксиальной линии длиной 18 см, волновое сопротивление которой плавно изменялось от 50 до 100 Ом. Положение второй и третьей секций можно было изменять. Все три секции ускорителя заливались трансформаторным маслом.

На выходе генератора устанавливался диод, который откачивался форвакуумным насосом. Волновое сопротивление диода плавно увеличивалось на длине 4.5 см и в области трубчатого катода составляло ≈ 150 Ом. Трубчатый катод с внутренним диаметром 8 мм был изготовлен из фольги толщиной 100 мкм из нержавеющей стали. Для регистрации тока пучка использовался конусный коллектор с диаметром приемной части 20 мм, который имел временное сопротивление не хуже 100 пс [17]. Внутренний объем корпуса коллектора откачивался форвакуумным насосом. Работа ускорителя была исследована при межэлектродных зазо-

рах: 4, 11,5, 15 и 18 мм. Вывод тока пучка осуществлялся через AlMg-фольгу толщиной 40 мкм. Для его ослабления применялись сетки из латуни. Измерения импульсов напряжения на выходе из первой, второй и третьей секций ускорителя проводились с помощью емкостных делителей U_2 , U_3 и U_4 . Отметим, что применение неоднородной линии позволило увеличить зазор между ее электродами у газового диода, что снизило напряженность электрического поля в проходном изоляторе.

Зарядка двойной формирующей линии осуществлялась от вторичной обмотки импульсного трансформатора, разработанного для генератора РАДАН-220 [3], который был расположен между двумя coaxialными алюминиевыми цилиндрами со встроенными магнитными сердечниками. При срабатывании разрядника в первичном контуре трансформатора (на рисунке не показаны) происходила зарядка двойной формирующей линии. При напряжении, близком к максимальному, срабатывал разрядник высокого давления Р-49. В первой секции формировался наносекундный импульс напряжения с амплитудой в передающей линии ≈ 190 кВ, который подавался на вторую секцию, где его амплитуда увеличивалась в ≈ 1.3 раза. Далее по линии с переменным волновым сопротивлением импульс напряжения подавался на трубчатый катод газового диода. Это позволило получить импульсы напряжения длительностью не более 0.5 нс и с максимальной амплитудой при холостом ходе до ~ 1000 кВ. Давление воздуха в диоде могло изменяться от 0.05 до 760 Торр. Изменение давления воздуха позволяло регулировать длительность импульса тока пучка [18].

Сигналы с емкостных делителей и коллектора подавались на цифровой осциллограф Keysight DSO-X6004A (6 ГГц, 20 выборок/нс) через высокочастотные кабели 5D-FB PEEG (Radiolab) длиной 1.2 м. Для ослабления сигналов использовались ослабители 142-NM (Barth Electronics, 30 ГГц). Энергия тока пучка за один импульс измерялась с помощью калориметра ТПИ-2М.1, который ранее применялся для измерения энергии как электронных пучков, так и излучения импульсных лазеров [19].

Для облучения пучком электронов использовались образцы в виде плоскопараллельных пластинок, которые устанавливались за анодной фольгой перпендикулярно потоку электронов. Спектры излучения и поглощения образцов регистрировались с помощью спектрометра HR2000+ES (Ocean Optics Inc.) с известной спектральной чувствительностью в диапазоне длин волн от 190 до 1100 нм (разрешение 0.9 нм). По сравнению с работой [12], мы провели дополнительную калибровку спектрометра вместе со световодом и уточнили спектральную чувствительность в области 450–

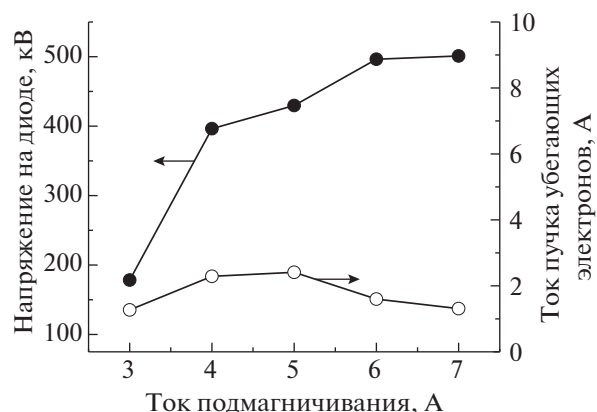


Рис. 2. Зависимости амплитуды импульса напряжения на диоде, а также амплитуды тока пучка убегающих электронов за фольгой от величины тока подмагничивания через соленоид ферритовой линии. Давление воздуха в диоде 760 Торр. Межэлектродный зазор $d = 18$ мм.

500 нм. В этой области при регистрации спектров излучения В.–Ч. в образцах из кварцевого стекла, алмаза и сапфира при их возбуждении пучком электронов наблюдалась слабая полоса [20]. В работе [20] было высказано предположение, что слабая полоса с максимумом излучения на длине волны 490 нм возникает из-за влияния рентгеновского излучения на спектрометр и световод. Однако проверка показала, что эта полоса связана с неточностью кривой чувствительности спектрометра. Поэтому была проведена дополнительная калибровка спектрометра и световода.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Вначале были определены условия получения максимальных напряжений на газовом диоде, которые зависели от местоположения ферритовой и неоднородной линий, величины тока через соленоид ферритовой линии, давления воздуха в газонаполненном диоде и межэлектродного зазора. Ферритовая линия давала наибольшее увеличение напряжения на диоде при ее установке после двойной формирующей линии (секции 1). Это достигалось за счет более эффективной работы неоднородной линии при уменьшении длительности импульса напряжения. В связи с этим подробные исследования ускорителя были проведены при расположении секций, показанном на рис. 1. На рис. 2 приведена зависимость напряжения на промежутке от величины тока подмагничивания в соленоиде при давлении воздуха в диоде 1 атм.

Наибольшие напряжения на промежутке при всех использованных в исследованиях давлениях воздуха в диоде достигались при токе подмагничивания 6–7 А. Поэтому в экспериментах по при-

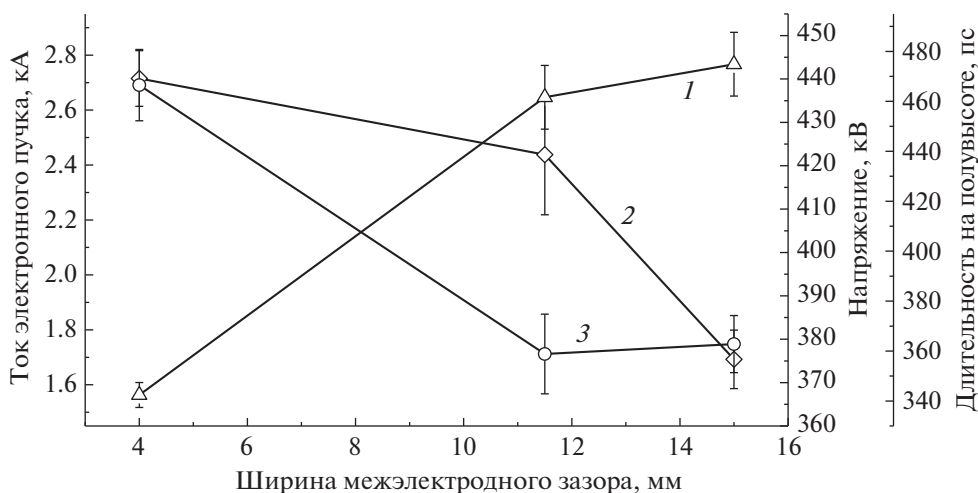


Рис. 3. Зависимости амплитуды импульса напряжения на диоде (1), а также амплитуды (2) и длительности (3) тока пучка за фольгой от межэлектродного зазора d в диоде при давлении воздуха ≈ 0.057 Торр.

менению ускорителя для получения излучения В.—Ч. использовались эти значения токов подмагничивания. Наибольшая амплитуда тока пучка убегающих электронов при атмосферном давлении воздуха была получена при токе подмагничивания 5 А и напряжении на газовом диоде меньше максимального. Сравнительно малая величина тока пучка убегающих электронов в этих условиях была обусловлена относительно медленным нарастанием напряжения во время начальной части импульса тока пучка (≈ 1.5 нс до уровня 0.2) и неоптимальной конструкцией катода для получения максимальной амплитуды тока убегающих электронов при атмосферном давлении воздуха. Однако при малых давлениях воздуха в газовом диоде с тем же катодом ток пучка увеличивался на несколько порядков.

Рис. 3 демонстрирует влияние длины межэлектродного зазора на амплитуды импульса напряжения и тока пучка, а также на длительность импульса тока пучка. Как и следовало ожидать в этих условиях, см., например, [18], с увеличением межэлектродного зазора ток пучка уменьшается, а напряжение на промежутке растет. По сравнению с ускорителем ГИН-500 применение третьей секции существенно увеличило амплитуду тока пучка и сократило его длительность до ≈ 370 пс.

Влияние давления на параметры ускорителя в оптимальном режиме, который примерно соответствует согласованию волновых сопротивлений генератора и диода, иллюстрирует рис. 4. Применение в ускорителе трех секций вместо двух существенно расширило диапазон давлений в газовом диоде, при которых амплитуды импульса напряжения и тока пучка, а также длительности импульса тока пучка существенно не меняются. На основе проведенных исследований для

воздействия на образцы были выбраны два режима, в которых давление в газовом диоде составило ≈ 0.057 Торр. В первом режиме, с межэлектродным зазором 15 мм, напряжение на диоде составило ≈ 450 кВ, а ток пучка за фольгой и диафрагмой диаметром 2 см был равен ~ 1.7 кА. Во втором режиме, с межэлектродным зазором 4 мм, напряжение на диоде составило ≈ 370 кВ, но ток пучка за фольгой и диафрагмой увеличился до 2.7 кА.

На рис. 5 приведены осциллограммы тока пучка и импульса напряжения, а также автограф пучка. Минимальная длительность импульса тока на полувысоте в этих условиях составила ≈ 370 пс. На автографе наблюдается более сильное потемнение в центральной части пучка и видны темные точки, обусловленные пробоями в винипрозе из-за накопления заряда электронов. Плотность тока пучка в центре автографа на диаметре 3 мм превышала 1000 А/см².

Для дополнительной проверки полученных параметров тока пучка было проведено измерение суммарной энергии электронов пучка с помощью калориметра ТПИ-2М.1. При межэлектродном зазоре 15 мм измеренная энергия пучка электронов составила ≈ 0.45 Дж.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСА НАПРЯЖЕНИЯ

Результаты экспериментов по увеличению амплитуды импульса напряжения с помощью коаксиальной линии с переменным волновым сопротивлением (секция 3) сравнивались с данными численного эксперимента, полученными с использованием осесимметричной версии кода KAPAT [21]. Моделирование было проведено для импульсов напряжения падающей волны с плоской

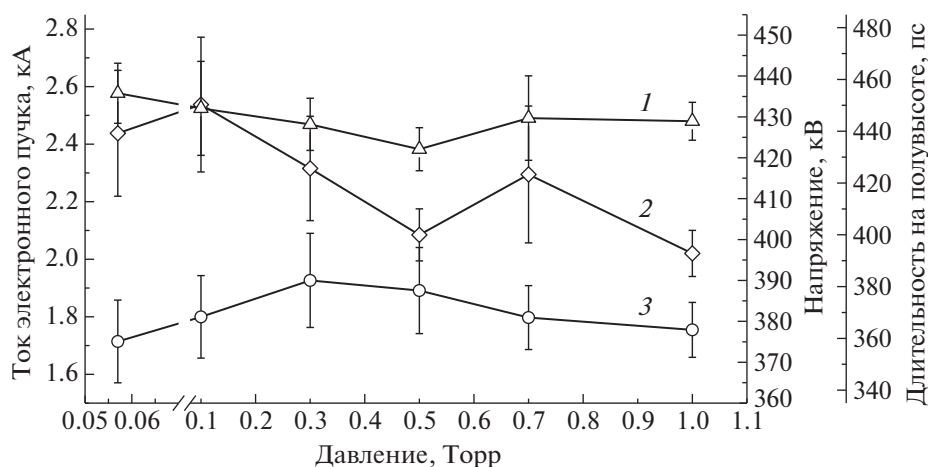


Рис. 4. Зависимости амплитуды импульса напряжения на диоде (1), а также амплитуды (2) и длительности (3) тока пучка за фольгой от давления воздуха в диоде. Межэлектродный зазор $d = 11.5$ мм.

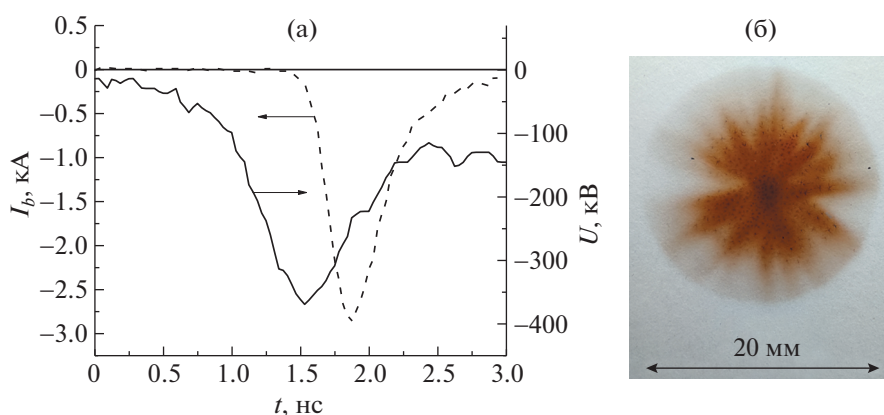


Рис. 5. Осциллограммы импульсов напряжения на диоде и тока пучка за фольгой (а), а также автограф пучка электронов в винипрозе за 10 импульсов при межэлектродном зазоре $d = 4$ мм и давлении воздуха в диоде 0.057 Торр (б).

вершиной и различной длительностью фронта импульса при его линейном росте. Расчет был выполнен для длительностей фронта 0.1, 0.3, 0.6 и 2 нс. Соответственно этому увеличение амплитуды импульса напряжения на газовом диоде при холостом ходе составило 3.9, 3.7, 3 и 2.6 раза. Применение коаксиальной линии дает оптимальный выигрыш при фронте импульса 0.3 нс. Увеличение в 3.7 раза было получено и при моделировании с экспериментальным импульсом напряжения после ферритовой линии. Таким образом, проведенный расчет подтвердил эффективную работу коаксиальной линии с переменным волновым сопротивлением при предварительном сокращении фронта импульса напряжения с помощью ферритовой линии.

При дальнейшем сокращении фронта импульса (до 0.1 нс) амплитуда импульса напряжения на катоде газового диода повышалась незначительно ($\approx 5\%$). Так как для дальнейшего сокращения

фронта импульса использование одной ферритовой линии в ускорителе данной конструкции уже недостаточно, требуется установка второй ферритовой линии. Это существенно усложняет конструкцию ускорителя и увеличивает его размеры.

РЕГИСТРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА–ЧЕРЕНКОВА И ИМПУЛЬСНОЙ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

На рис. 6 приведены спектры излучения образцов из кварцевого стекла КУ-1 и КВг при возбуждении пучком электронов созданного ускорителя. В излучении образца из КУ-1 доминирует излучение В.–Ч., интенсивность которого растет с уменьшением длины волны. В излучении образца из КВг присутствует как излучение В.–Ч., так и полоса импульсной катодолюминесценции в области 370–500 нм. Полоса излучения В.–Ч. хо-

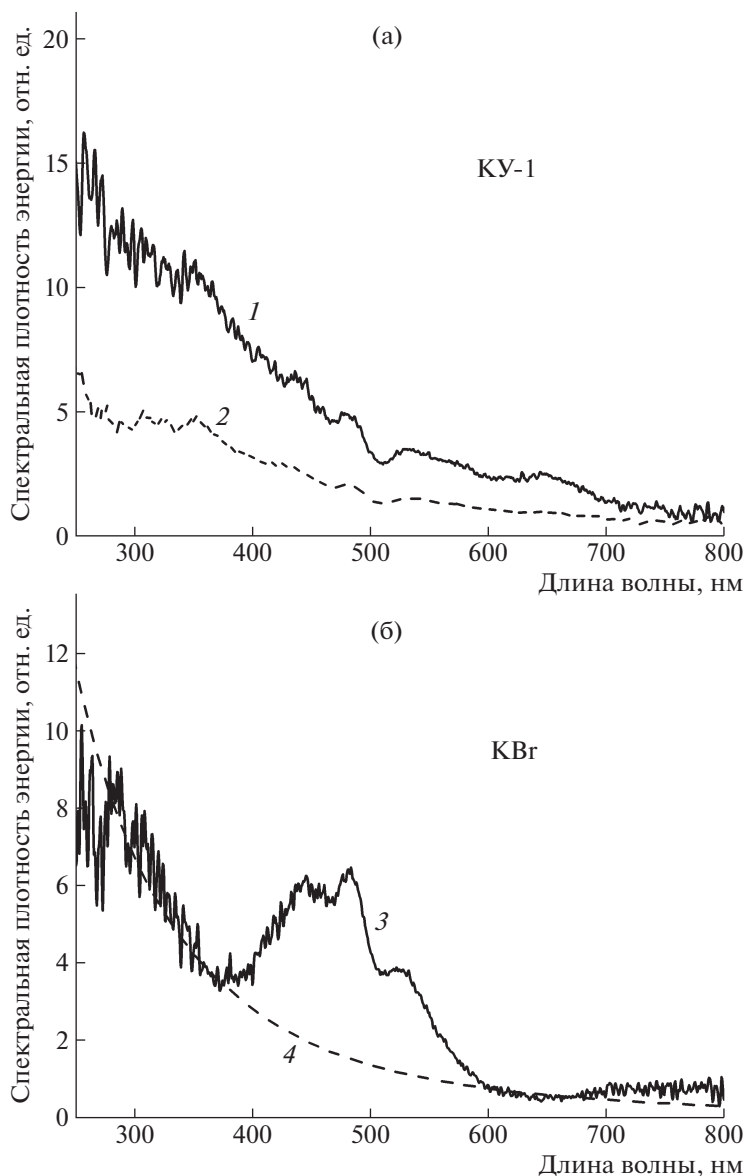


Рис. 6. Спектры излучения кварцевого стекла КУ-1 (а) при межэлектродном расстоянии в диоде 4 (1) и 15 мм (2) и образца КВг (б) при межэлектродном расстоянии 15 мм (3), а также расчетная зависимость (4) спектральной плотности энергии излучения В.–Ч. в образце КВг, нормированная на длину волны 350 нм на экспериментальную зависимость.

рошо совпадает с расчетной, которая была определена по известной формуле [12, 22].

При облучении образца из полиметилметакрилата наблюдались и.к.л. и излучение В.–Ч., но энергия в регистрируемой полосе и.к.л. была больше, чем в излучении В.–Ч., см. подробное описание в [23].

ВЫВОДЫ

Создан и испытан ускоритель электронов ГИН-1000, состоящий из трех секций различной конструкции и газонаполненного диода. Данный ускоритель позволяет формировать импульсы на-

пряжения на газонаполненном диоде с амплитудой до 500 кВ и имеет сравнительно простую конструкцию. Энергия пучка при субнаносекундной длительности импульса (370 пс на полувысоте) достигала ≈ 0.45 Дж, а плотность тока пучка в центре автографа превышала 1000 А/см². С помощью данного ускорителя в кварцевом стекле КУ-1, полиметилметакрилате и кристалле КВг было зарегистрировано излучение Вавилова–Черенкова.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят И.В. Романченко за полезные обсуждения и помощь при создании секции ускорителя с

ферритовой линией и В.И. Пегеля за проведение численного эксперимента с использованием кода KARAT.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Ускоритель был разработан в рамках проекта Российского научного фонда № 18-19-00184, а статья подготовлена для печати в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белкин Н.В., Комяк Н.И., Пеликс Е.А., Цукерман В.А.* // ПТЭ. 1972. № 2. С. 194.
2. *Martin T.H.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1973. V. 20. № 3. P. 289.
<https://doi.org/10.1109/TNS.1973.4327103>
3. *Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г., Юрике Я.Я., Яландин М.И.* // ПТЭ. 1989. № 2. С. 146.
4. *Желтов К.А.* Пикосекундные сильноточные электронные ускорители. М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. *Mehnert R.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. 1996. V. 113. № 1–4. P. 81.
[https://doi.org/10.1016/0168-583X\(95\)01344-X](https://doi.org/10.1016/0168-583X(95)01344-X)
6. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.
7. *Шпак В.Г., Яландин М.И.* // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5.
<https://doi.org/10.1023/A:1017535304915>
8. *Tarassenko V.F., Kostyrya I.D., Baksht E.K., Rybka D.V.* // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2011. V. 18. № 4. P. 1250.
<https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.5976123>
9. *Юрьев А.Л., Эльяш С.Л., Лойко Т.В., Пухов С.П., Николаев Д.П., Селезнев А.А.* // ПТЭ. 2017. № 6. С. 78.
<https://doi.org/10.7868/S0032816217050147>
10. *Эльяш С.Л., Лойко Т.В., Юрьев А.Л., Селезнев А.А.* // ПТЭ. 2019. № 4. С. 79.
<https://doi.org/10.1134/S0032816219030169>
11. *Тарасенко В.Ф., Алексеев С.Б., Бакуит Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И.* // ПТЭ. 2020. № 3. С. 78.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220040096>
12. *Тарасенко В.Ф., Бакуит Е.Х., Ерофеев М.В., Бураченко А.Г.* // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129. № 5. С. 569.
13. *Romanchenko I.V., Rostov V.V., Gunin A.V., Konev V.Y.* // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. № 2. P. 024703.
<https://doi.org/10.1063/1.4975182>
14. *Gusev A.I., Pedos M.S., Rukin S.N., Timoshenkov S.P.* // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. № 7. P. 074703.
<https://doi.org/10.1063/1.4993732>
15. *Rukin S.N.* // Rev. Sci. Instrum. 2020. V. 91. № 1. P. 011501.
<https://doi.org/10.1063/1.5128297>
16. *Kozlov B.A., Makhanko D.S.* // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 2064. № 1. P. 012126.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012126>
17. *Балзовский Е.В., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* // ПТЭ. 2015. № 5. С. 62.
<https://doi.org/10.7868/S003281621505002X>
18. *Алексеев С.Б., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* // ПТЭ. 2013. № 5. С. 85.
<https://doi.org/10.7868/S0032816213040162>
19. *Бузаев С.П., Абдуллин Э.Н., Зорин В.Б., Ковальчук Б.М., Логинов С.В., Месяц Г.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Толкачев В.С., Щанин П.М.* // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 9. С. 801.
20. *Tarassenko V.F., Oleshko V.I., Erofeev M.V., Lipatov E.I., Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Burachenko A.G., Baksht E.Kh.* // J. Appl. Phys. 2019. V. 125. № 24. P. 244501.
<https://doi.org/10.1063/1.5094956>
21. *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code KARAT. Berkeley, VA: Springfield, 1992.
22. *Landau L.D., Bell J.S., Kearsley M.J., Pitaevskii L.P., Lifshitz E.M., Sykes J.B.* Electrodynamics of Continuous Media. Oxford: Pergamon Press, 1984.
23. *Тарасенко В.Ф., Бакуит Е.Х., Ерофеев М.В.* // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. № 6. С. 7.
<https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.06.50749.18601>